

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

«Simulazione dei flyby di Juno sulle lune gioviane con GMAT»

Tutor universitario: Prof. Colombatti Giacomo

Laureando: *Pilot Matteo 2101968*

Anno Accademico: 2025/2026

Regione di spazio dominata dal **campo gravitazionale** e **magnetico** di Giove

Giove

- **pianeta gassoso** composto principalmente da **idrogeno** ed **elio**
- **nucleo** di elevate dimensioni, **indistinto** e **diluito**



Lune Galileiane

- **Io** → corpo con **maggior attività vulcanica** nel Sistema Solare
- **Europa** → presenta un **oceano sotterraneo** di acqua allo stato liquido
- **Ganimede** → unica luna con **magnetosfera propria**
- **Callisto** → luna più antica del Sistema Solare

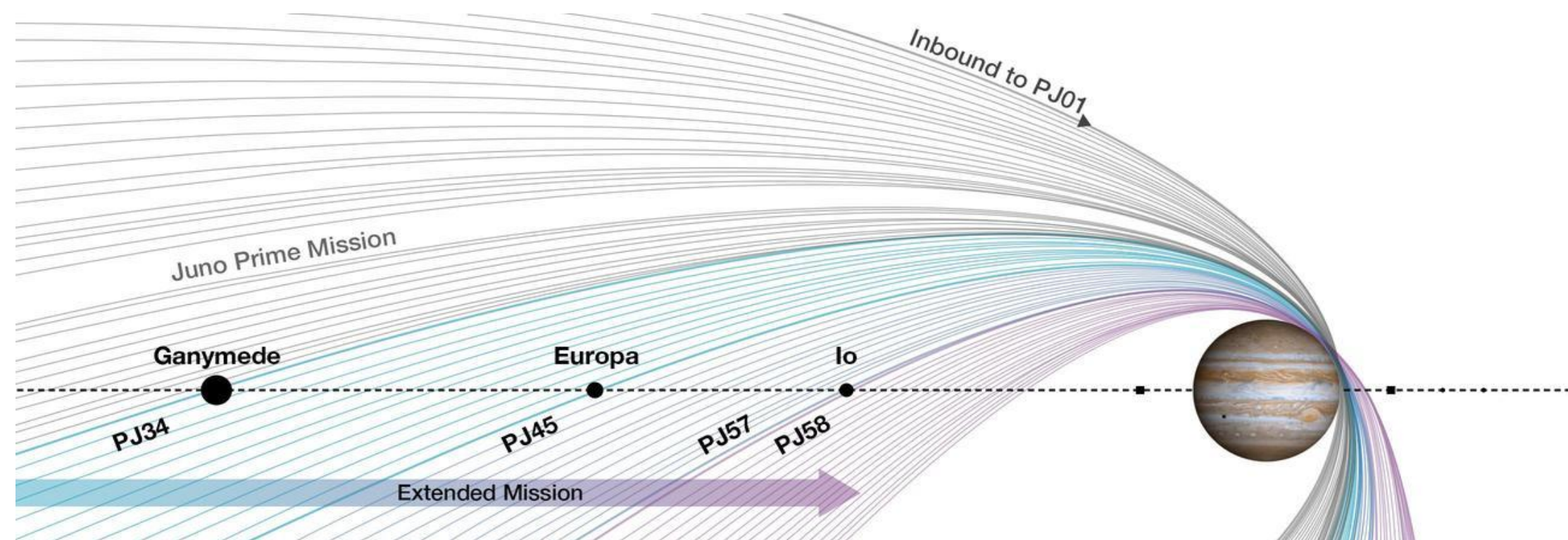
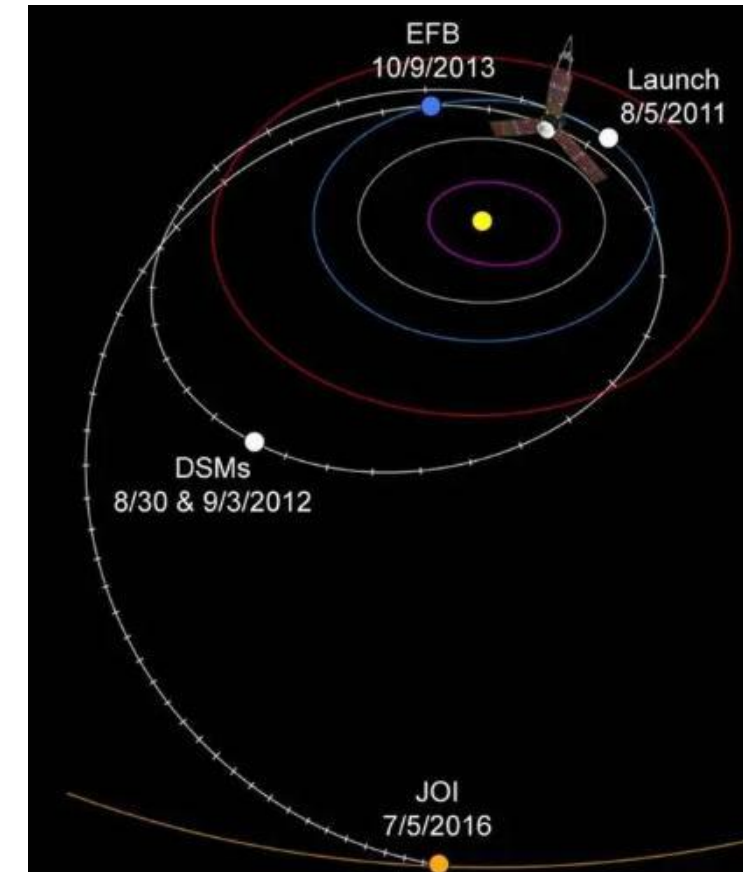


- **Missione principale**

- compiere **studi** ed **osservazioni** su **Giove**

- **Missione estesa**

- motivazioni:
 - possibilità di compiere **studi** sul **sistema gioviano**
 - possibile **impatto** su una luna durante la manovra di **deorbit**



- **determinare i modelli di forza** attendibili per la generazione delle **sfere d'influenza gravitazionale** delle lune
- **simulare i flyby** di Juno sulle lune galileiane ipotizzando le possibili **manovre correttive** e verificare la successiva **variazione** del **periodo orbitale** rispetto a Giove
- **garantire** che sia ancora presente una **quantità sufficiente** di **carburante** per il **secondo flyby su Io** e per l'eventuale manovra di **deorbit** di fine missione

scopo: **diminuire** il **periodo orbitale** rispetto a Giove

v_m = velocità della luna rispetto a Giove

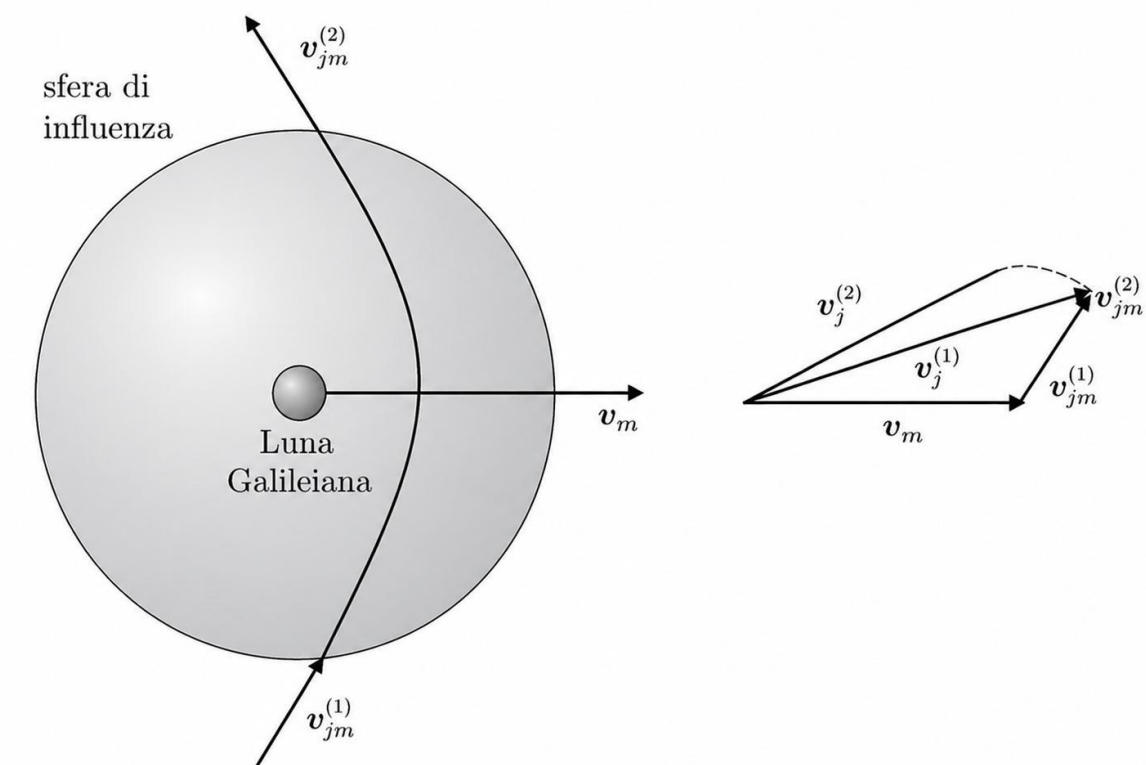
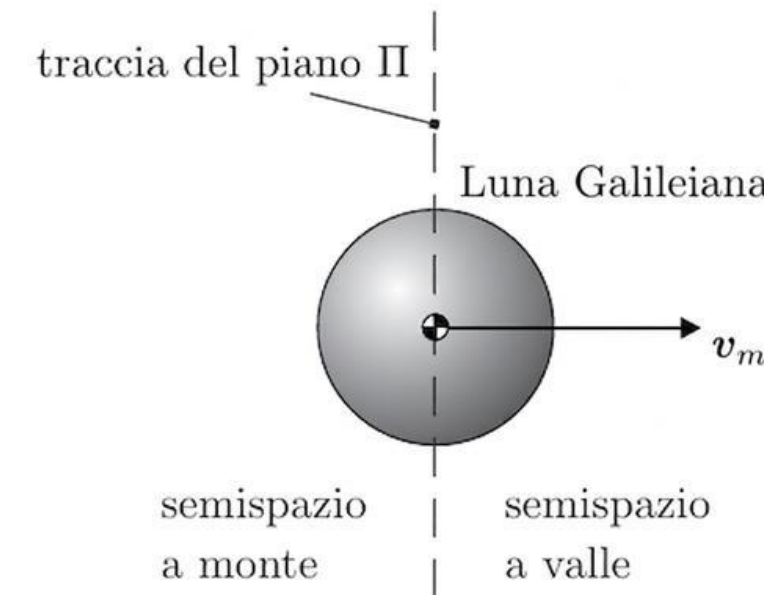
v_{jm} = velocità di Juno rispetto alla luna considerata

v_j = velocità di Juno rispetto a Giove

$$V_j = V_{jm} + V_m$$

per la riduzione del periodo orbitale deve risultare $v_j^{(2)} < v_j^{(1)}$

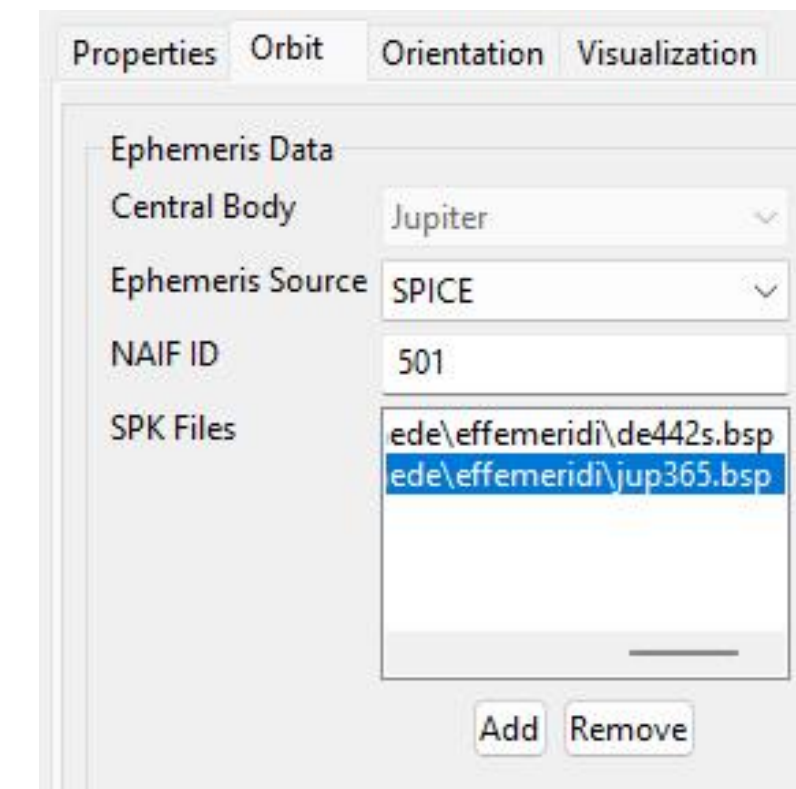
- ➔ il **pericentro** deve stare nel **semispazio a valle**
- ➔ compiere un **leading-side flyby**



- nella finestra **Properties**:
 - inserire i **parametri fisici**

Parametri	Io	Europa	Ganymede
μ [km ³ /sec ²]	5959.9	3202.71	9887.83
Equatorial Radius [km]	1821.5	1560	2631.4
Flattening	0	0	0

- nella finestra **Orbit**:
 - numero **NAIF**
 - documenti **SPK** *de442.bsp* e *jup365.bsp*



- nella finestra **Orientation**:
 - parametri di **orientamento**
del file *pck00011.tpc*

BODY502_POLE_RA =(268.08, -0.009, 0.0)
BODY502_POLE_DEC =(64.51, 0.03, 0.0)
BODY502_PM =(36.022, 101.3747235, 0.0)

- armonica $J_2 \rightarrow$ **appiattimento** assiale
- armonica $C_{22} \rightarrow$ **allungamento** lungo il piano equatoriale

Parametri	Io	Europa	Ganymede
μ [km ³ /sec ²]	5959.9	3202.71	9887.83
Equatorial Radius [km]	1821.5	1560	2631.4
J_2	$-1.8459 \cdot 10^{-3}$	$-4.38 \cdot 10^{-4}$	$-1.2753 \cdot 10^{-4}$
C_{22}	$5.537 \cdot 10^{-04}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$	$3.826 \cdot 10^{-5}$

[illegible]

Modello di gravità di Io in formato **COF**

Simulazione della manovra di flyby su Ganimede

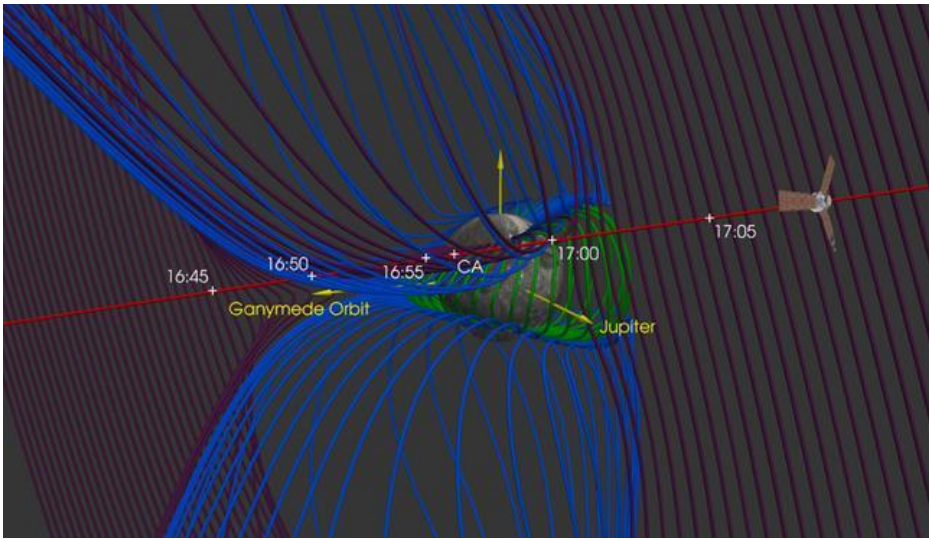
- 7 giugno del 2021 alle 16:56 UTC
- scopo scientifico: studiare la magnetosfera

Formato	Documento
SPK File	spk_rec_210513_210630_210707.bsp
FK File	juno_sc_rec_210606_210612_v01.bc
CK File	JNO_SCLKSCET.00115.tsc
SCLK File	juno_v12.tf

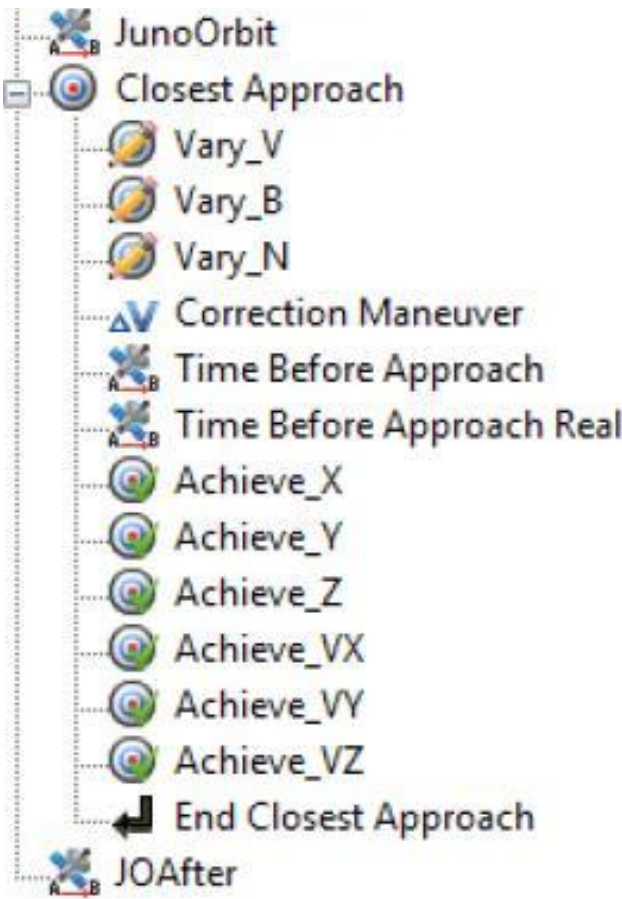
File SPICE per **JUNO**

Parametro	Valore
Epoch Format	TDBGregorian
Epoch	06 Jun 2021 00:00.000
Coordinate System	GanymedeCS
X [km]	1436826.245513082
Y [km]	-1827407.602415442
Z [km]	-1458098.27925998
VX [km/sec]	-3.470290289738948
VY [km/sec]	14.8517017252865
VZ [km/sec]	10.7899433432739
Dry Mass [kg]	1593

Valori ricavati con **Spyder** per
JunoSim



Rappresentazione dell'**interazione** tra la
magnetosfera di Giove e di Ganimede



Achieve	Valore	Tolleranza
Achieve_X	8293.04 km	100
Achieve_Y	-2809.14 km	100
Achieve_Z	-1544.72 km	100
Achieve_VX	-13.15 $\frac{km}{s}$	1
Achieve_VY	9.51 $\frac{km}{s}$	1
Achieve_VZ	8.835 $\frac{km}{s}$	1

Mission Sequence con relativi
Achieve

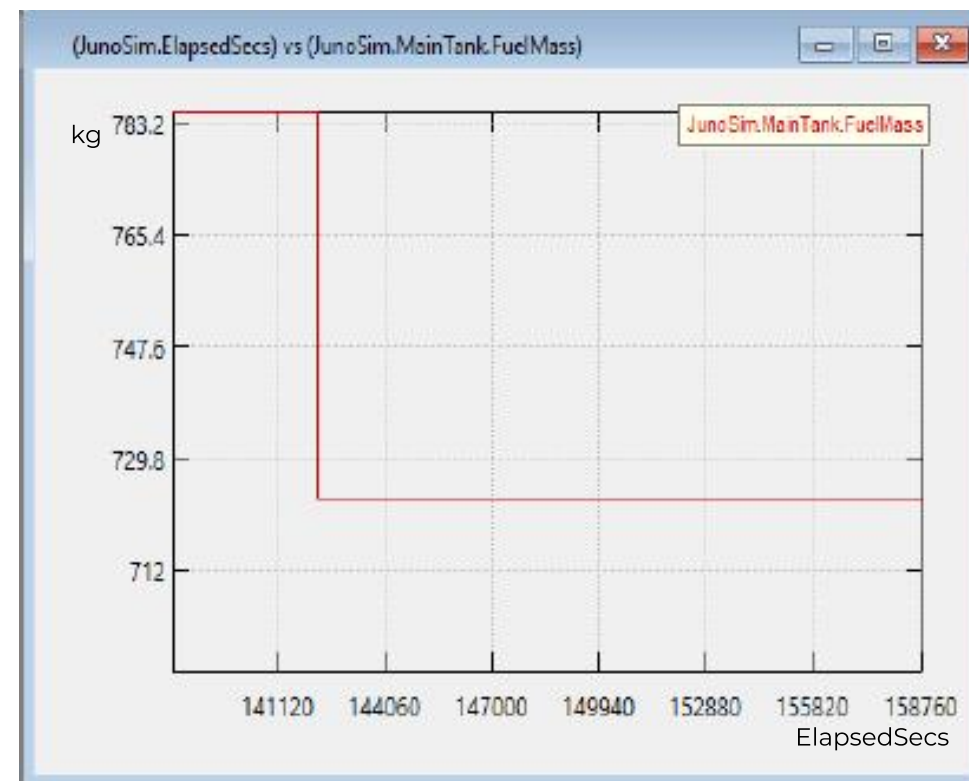
- periodo orbitale intorno a Giove abbreviato da **53 a 43 giorni**
- altitudine = 1038 km $v_{jm} = 18.64 \text{ km/s}$ massa finale = 726.4 kg



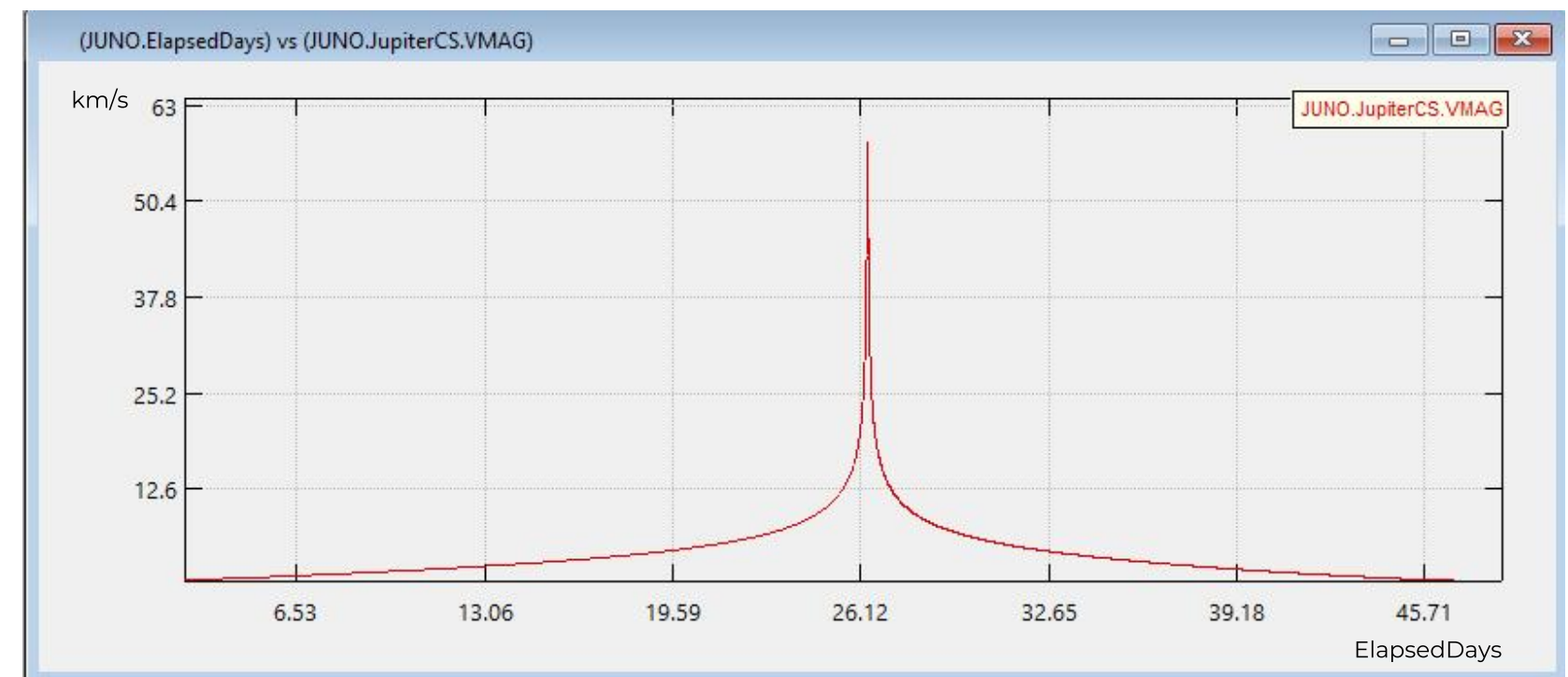
Orbit View rispetto a Ganimede



Orbit View rispetto a Giove



Consumo di propellente



Velocità di Juno rispetto a Giove

→ 29 settembre del 2022 alle 09:36 UTC

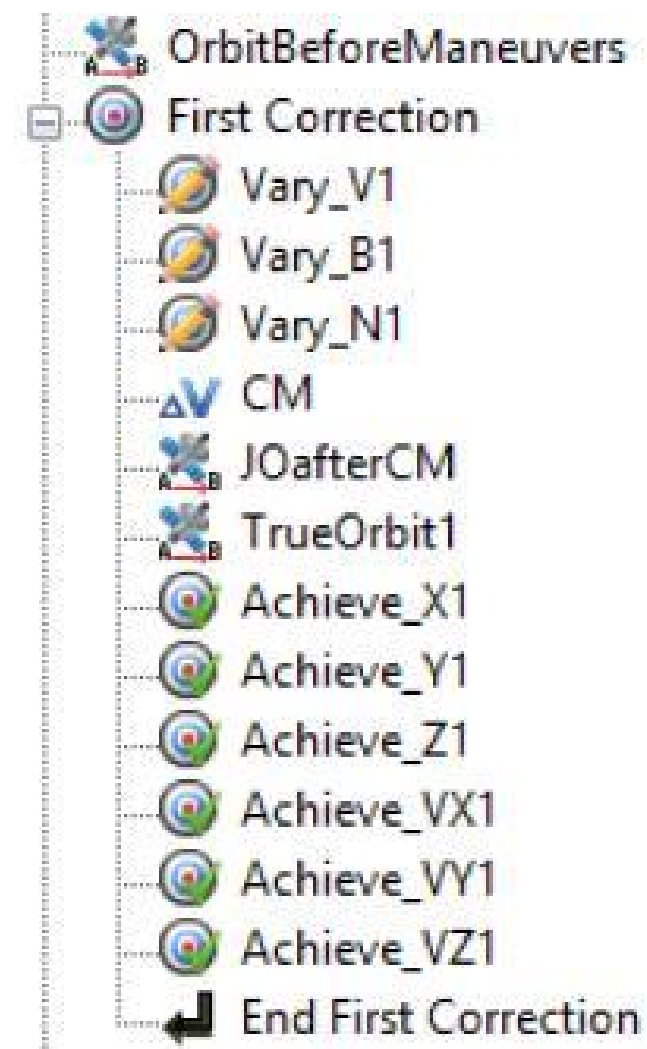
→ scopo scientifico: compiere osservazioni sulla superficie

Formato	Documento
<i>SPK File</i>	juno_rec_220909_221019_221027.bsp
<i>FK File</i>	juno_sc_rec_220925_221001_v01.bc

File SPICE per **JUNO**

Parametro	Valore
<i>Epoch Format</i>	TDBGregorian
<i>Epoch</i>	29 Sep 2022 00:00.000
<i>Coordinate System</i>	EuropaCS
<i>X [km]</i>	607371.5358066559
<i>Y [km]</i>	-393626.0720722303
<i>Z [km]</i>	-409412.679069384
<i>VX [km/sec]</i>	-15.77907601612227
<i>VY [km/sec]</i>	13.85493295082394
<i>VZ [km/sec]</i>	12.73792742786778
<i>Fuel Mass [kg]</i>	726.4

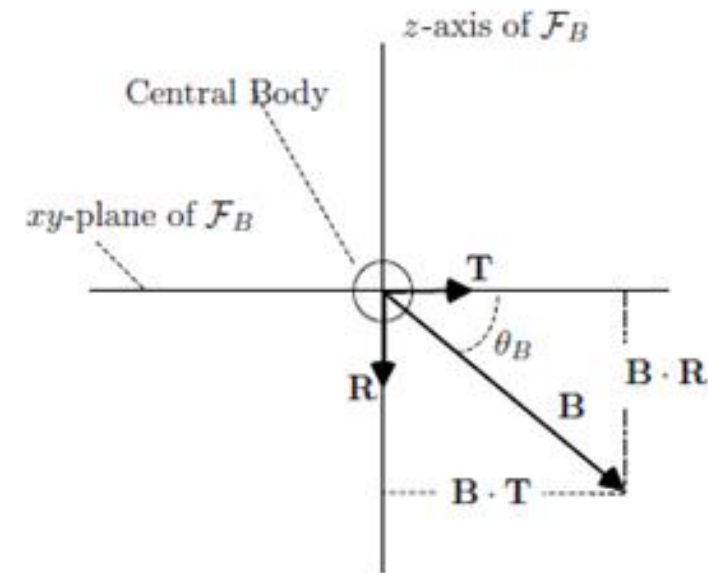
Valori ricavati con **Spyder** per
JunoSim



Superficie di Europa fotografata da SRU

Achieve	Valore	Tolleranza
<i>Achieve_X</i>	382235 km	3500
<i>Achieve_Y</i>	-220845 km	4000
<i>Achieve_Z</i>	-242861 km	4000
<i>Achieve_VX</i>	-17.424 $\frac{km}{s}$	1
<i>Achieve_VY</i>	11.76 $\frac{km}{s}$	1
<i>Achieve_VZ</i>	11.95 $\frac{km}{s}$	1

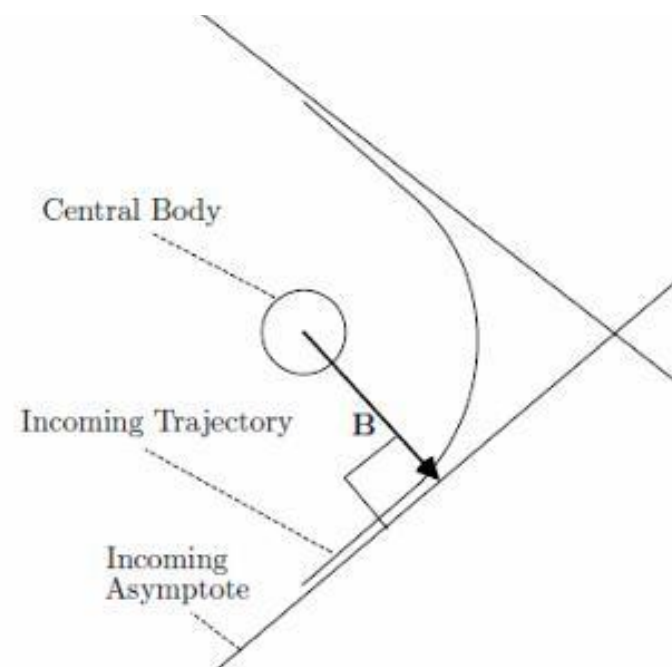
Mission Sequence con relativi **Achieve**
della prima manovra correttiva



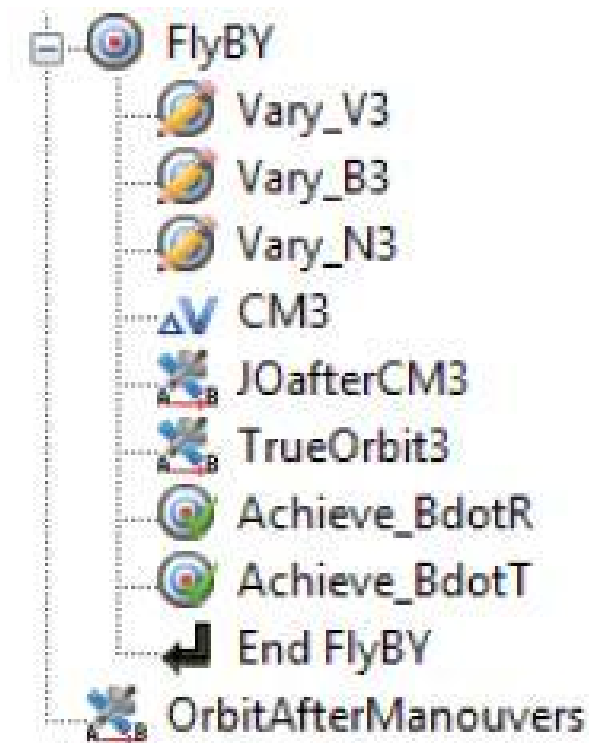
B-plane = sistema di coordinate planare per eseguire la **fase di targeting** durante il flyby

B-vector = linea che **collega** il **fuoco** dell'iperbole con il **punto di intersezione** tra l'asintoto e il B-plane

B-plane rispetto ad un punto di vista perpendicolare al piano stesso



B-vector rispetto ad un punto di vista perpendicolare al piano dell'orbita

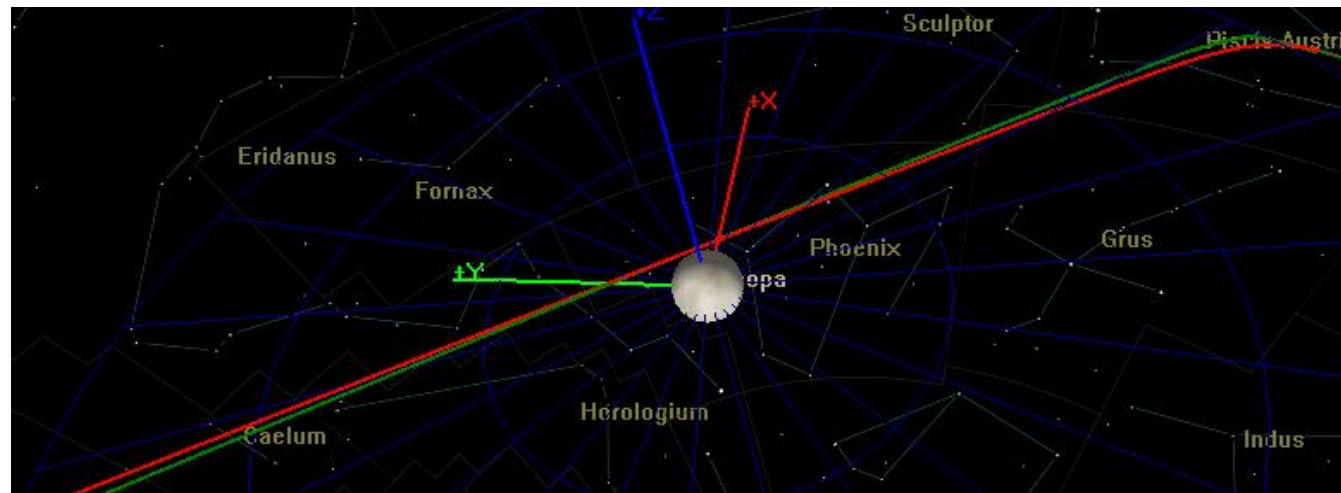


Achieve	Valore	Tolleranza
<i>Achieve_BdotR</i>	-752.923	0.0001
<i>Achieve_BdotT</i>	1767.33	0.0001

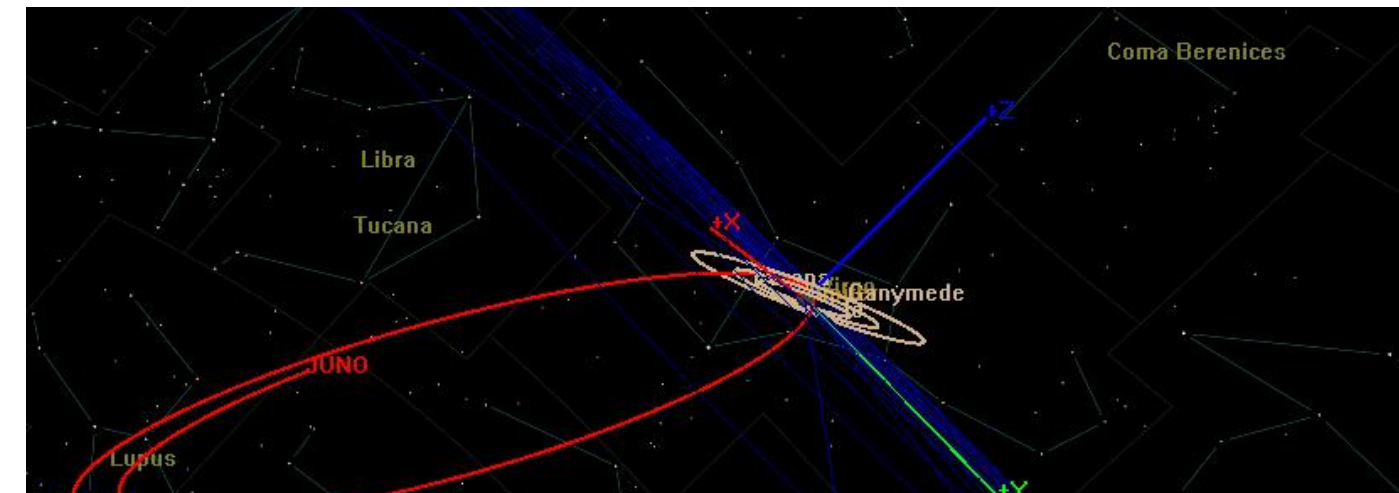
Mission Sequence con relativi **Achieve** della seconda manovra correttiva

Simulazione della manovra di flyby su Europa

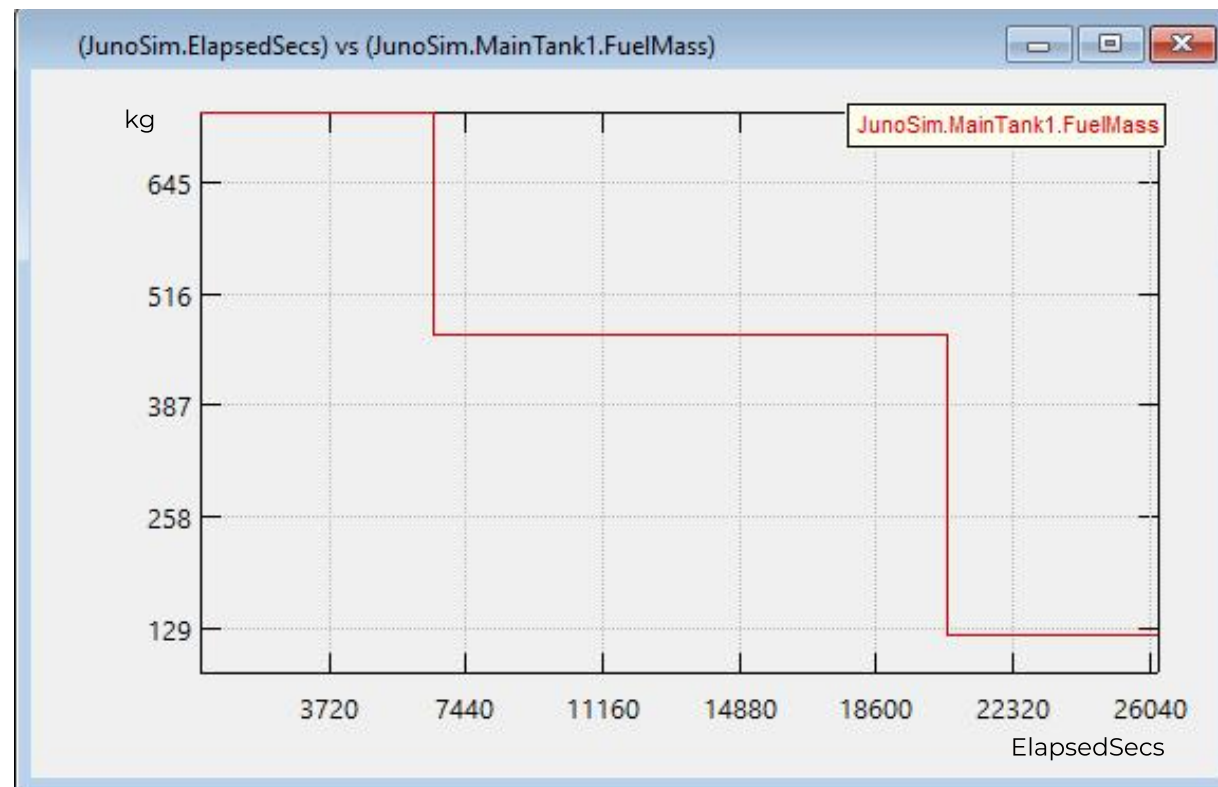
- periodo orbitale intorno a Giove abbreviato da **43 a 38 giorni**
- altitudine = 352 km $v_{jm} = 23.6 \text{ km/s}$ massa finale = 94 kg



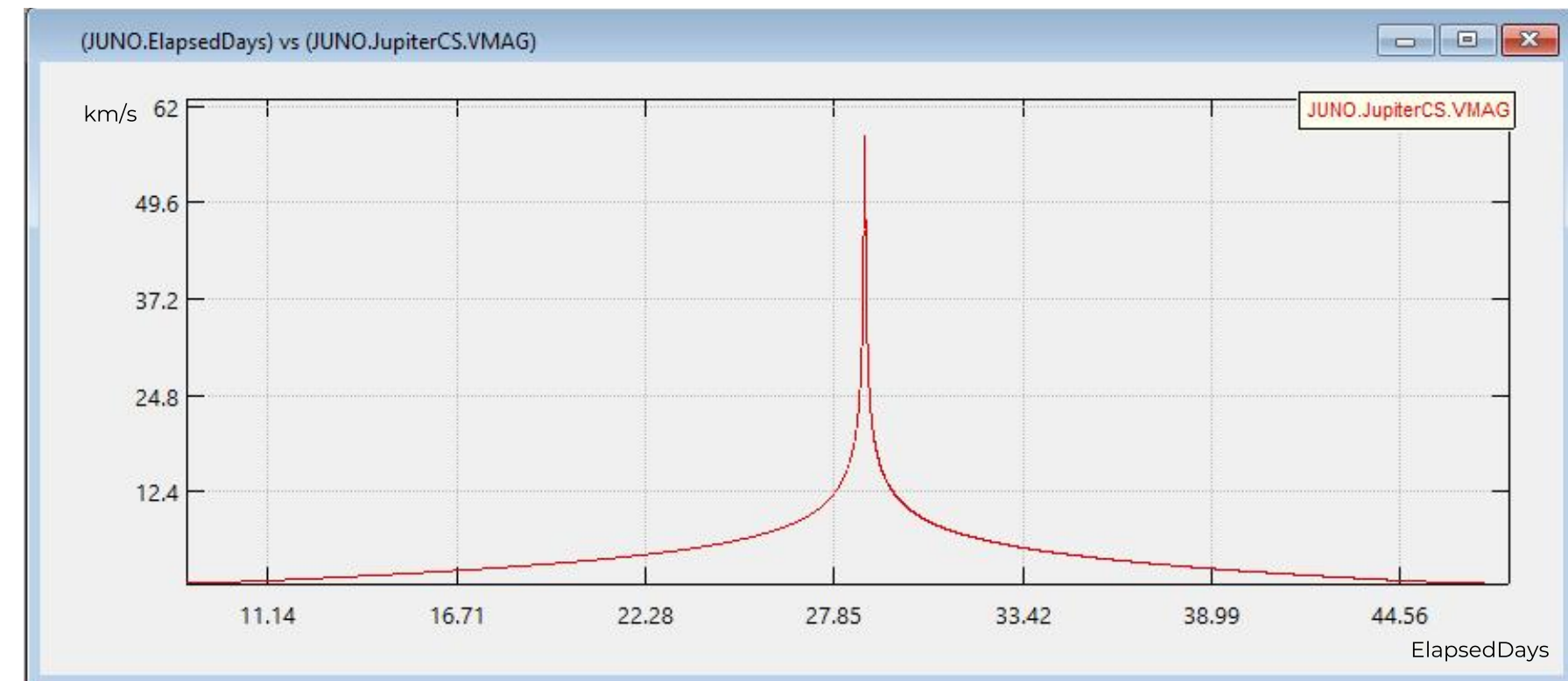
Orbit View rispetto a Europa



Orbit View rispetto a Giove



Consumo di propellente



Velocità di Juno rispetto a Giove

Simulazione della manovra di flyby su Io

→ 30 dicembre del 2023 alle 08:37 UTC

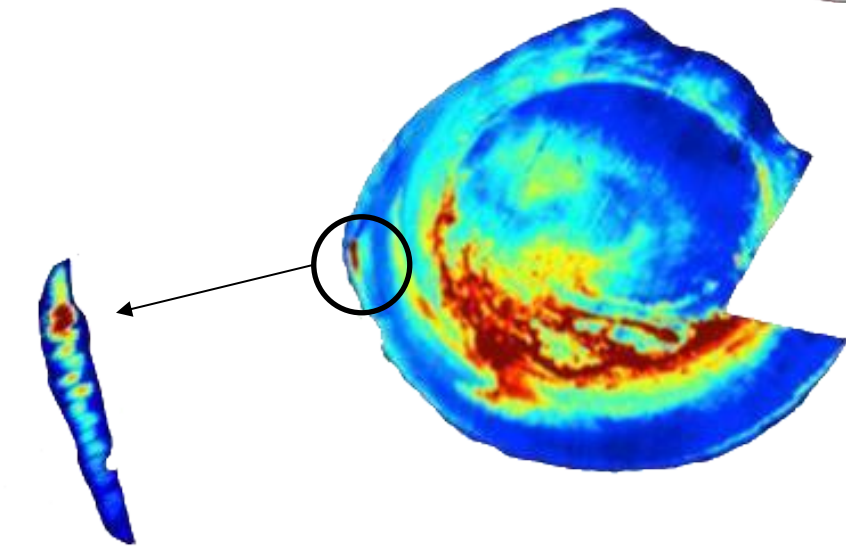
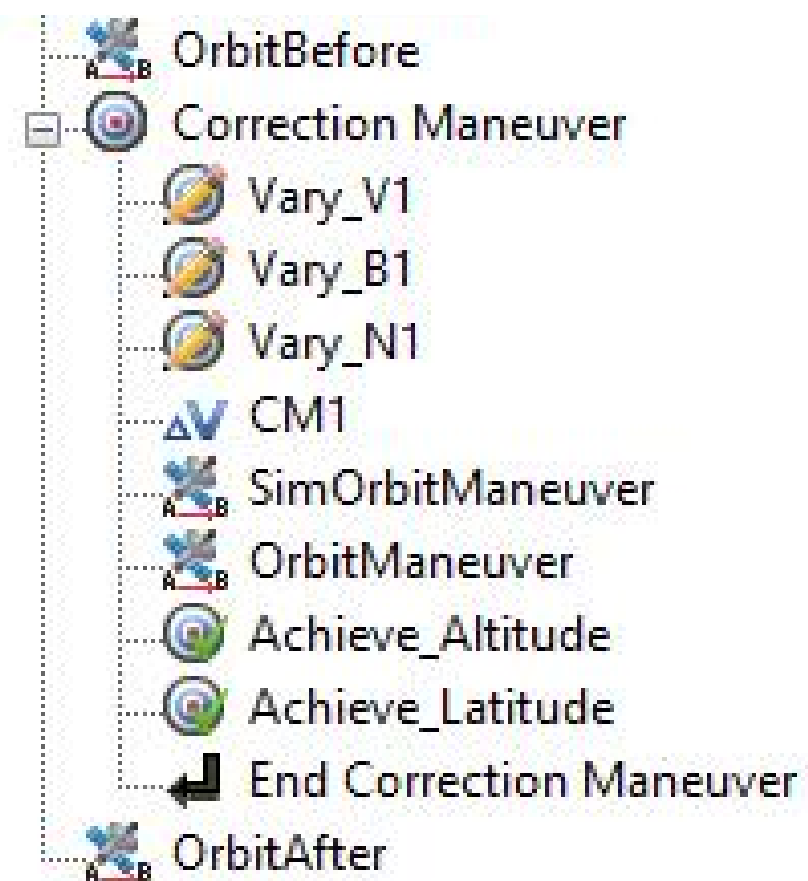
→ scopo scientifico: studiare l'attività vulcanica

Formato	Documento
<i>SPK File</i>	juno_rec_231212_240118_240119.bsp
<i>FK File</i>	juno_sc_rec_231224_231230_v01.bc

File SPICE per **JUNO**

Parametro	Valore
<i>Epoch Format</i>	TDBGregorian
<i>Epoch</i>	30 Dec 2023 00:00.000
<i>Coordinate System</i>	IoCS
<i>X [km]</i>	648353.4162051678
<i>Y [km]</i>	-446457.0339642167
<i>Z [km]</i>	-518135.3083646894
<i>V X [km/sec]</i>	-14.21933022526274
<i>V Y [km/sec]</i>	19.79481470723314
<i>V Z [km/sec]</i>	18.68187818868615
<i>Fuel Mass [kg]</i>	94

Valori ricavati con **Spyder** per
JunoSim

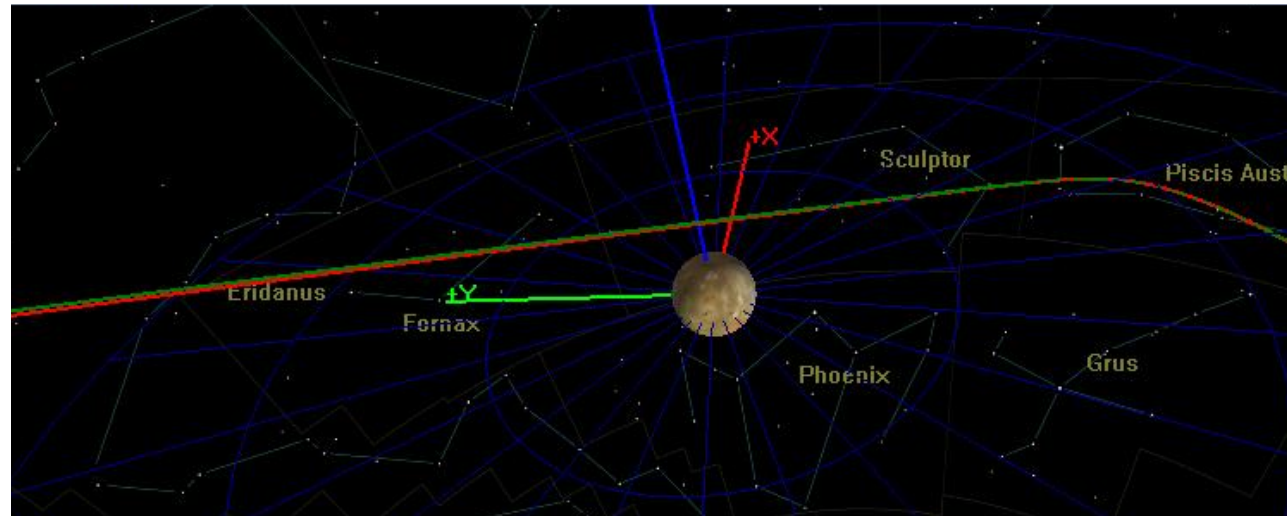


Impronta di Io sulle **aurore** di Giove

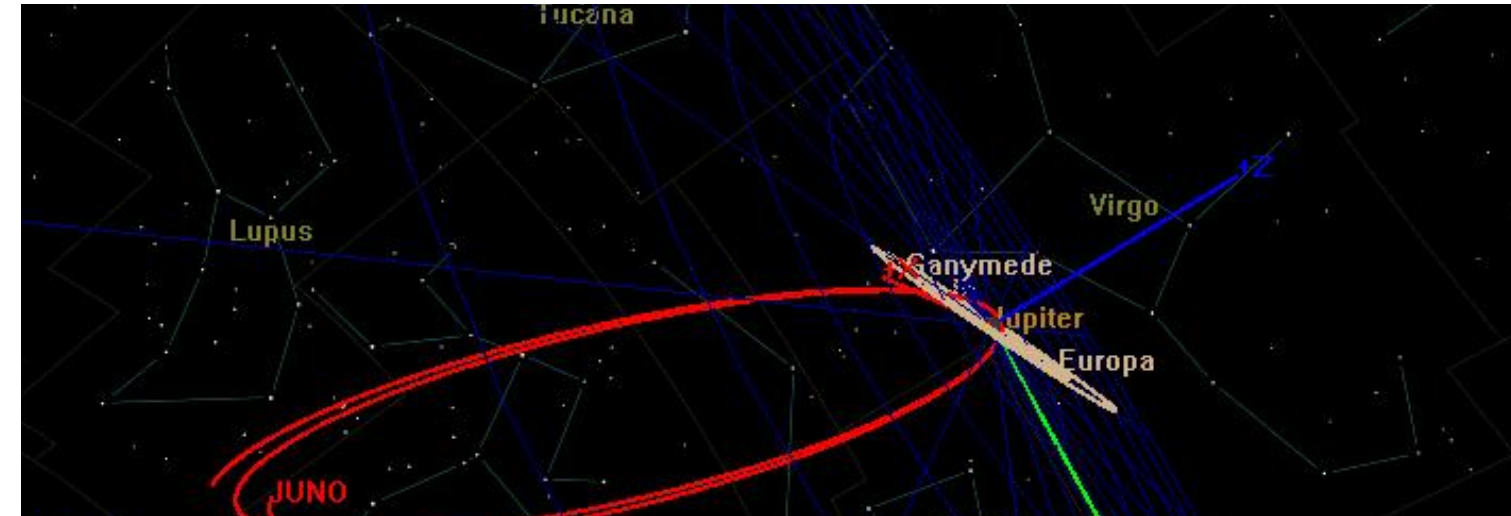
Achieve	Valore	Tolleranza
<i>Achieve_Altitude</i>	3304.414 km	100
<i>Achieve_Latitude</i>	19.161	0.55

Mission Sequence con
relativi **Achieve**

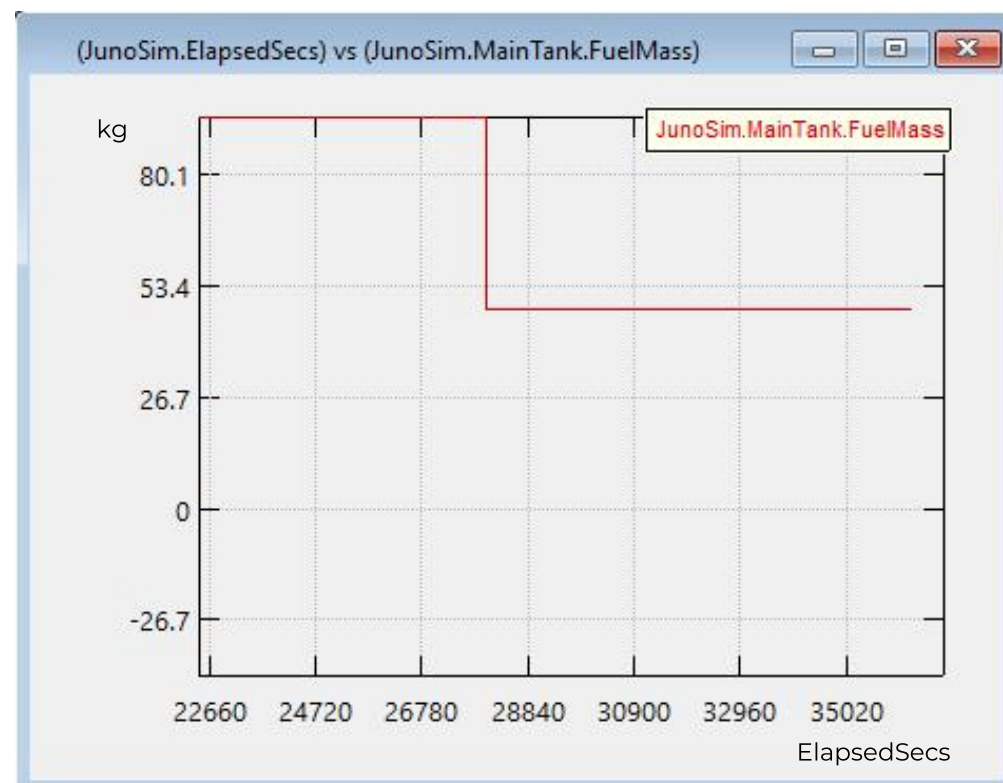
- periodo orbitale intorno a Giove abbreviato da **38 a 33 giorni**
- altitudine = 1496 km $v_{jm} = 30.08 \text{ km/s}$ massa finale = 47 kg



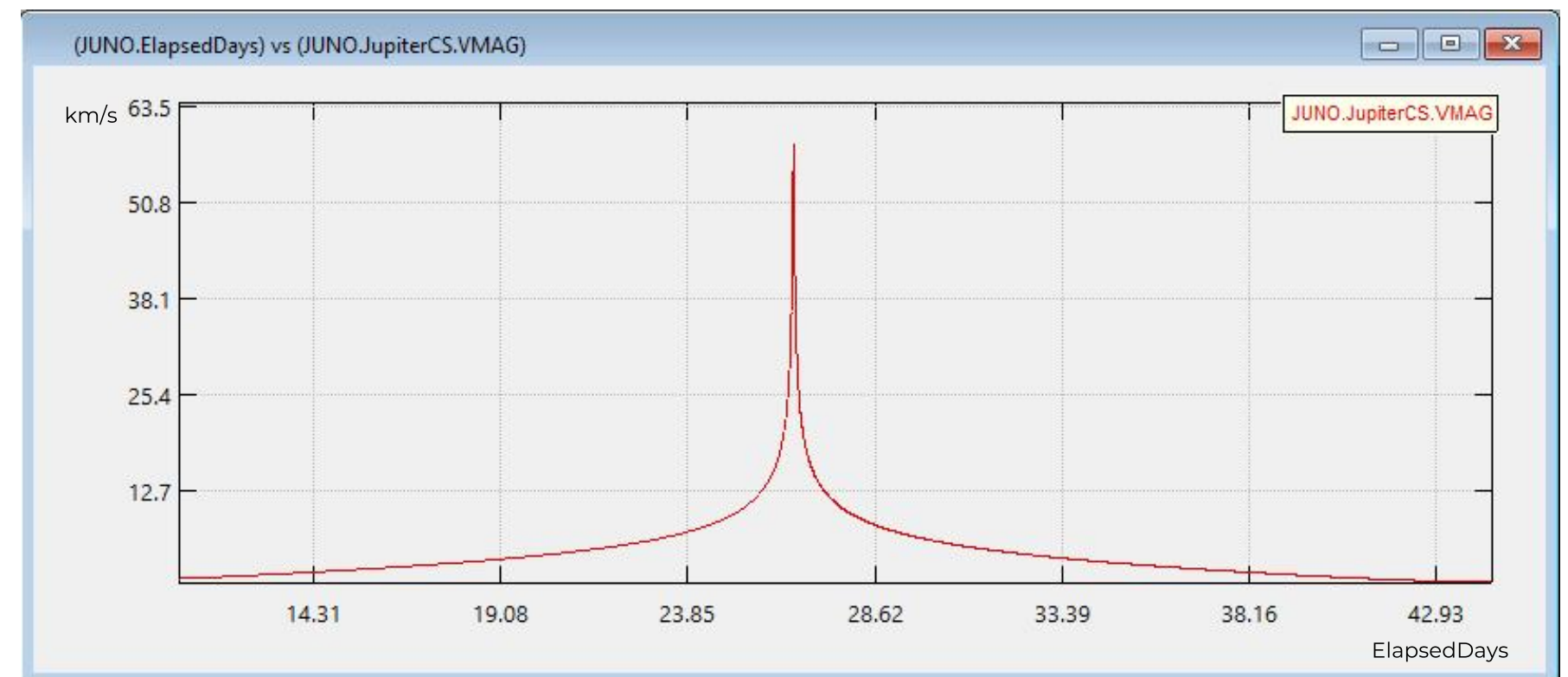
Orbit View rispetto ad Io



Orbit View rispetto a Giove



Consumo di propellente



Velocità di Juno rispetto a Giove

- la definizione dei **Gravity Model** ha dimostrato come il campo gravitazionale delle lune galileiane è principalmente determinato dalle armoniche **J_2** e **C_{22}**
- la simulazione dei **leading-side flyby** ha mostrato l'efficacia delle manovre correttive e l'effettiva **riduzione** del **periodo orbitale** permettendo così lo studio del sistema gioviano
- una volta compiuto il primo flyby su Io risultano ancora presenti **47 kg** di **propellente** sufficienti per lo **svolgimento** del **secondo flyby** su **Io** e della **manovra** di **deorbit**

1. NASA-National Aeronautics and Space Administration, Jupiter Facts, <https://science.nasa.gov/jupiter/jupiter-facts/>.
2. J. D. Anderson, E. L. Lau, W. L. Sjogren, G. Schubert, and W. B. Moore, "Gravitational constraints on the internal structure of Ganymede," *Nature*, vol. 384, no.6609, pp.541–543, Dec.1996. Available: <https://www.nature.com/articles/384541a0>.
3. NASA/JPL-Caltech, Juno Mission Overview-Press Kit. URL: https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/juno/overview/.
4. NASA/JPL-Caltech, Juno Mission: Quick Facts. NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). URL: https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/juno/facts/.
5. NASA/JPL, Horizons System. SolarSystemDynamicsGroup. URL: https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#.
6. S. Duling, J. Saur, M. von Papen, et al.(2022). Ganymede MHD Model: Magnetospheric Context for Juno's PJ34 Flyby. *Geophysical Research Letters*, 49(24), e2022GL101688. Available at: <https://doi.org/10.1029/2022GL101688>.
7. G. Mengali e A. A. Quarta. *Fondamenti di Meccanica del Volo Spaziale*. Pisa University Press, 2021. ISBN:978-8833395241.
8. Juno SPICE Kernel Data Set https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/pds/data/jno-j_e_ss-spice-6-v1.0/jnosp_1000/data/.
9. J. D. Anderson, R. A. Jacobson, E. L. Lau, W. B. Moore, and G. Schubert. Io's gravity field and interior structure. *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, no. E12, pp.32963–32969, December 25, 2001.
10. J. D. Anderson, E. L. Lau, W. L. Sjogren, G. Schubert, and W. B. Moore. Europa's Differentiated Internal Structure: Inferences from Two Galileo Encounters. *Science*, vol.276, no. 5316, pp.1236–1239, May 23, 1997. DOI: 10.1126/science.276.5316.1236.
11. NASA Goddard Space Flight Center. General Mission Analysis Tool(GMAT) – Documentation & Help. Disponibile online: <https://documentation.help/GMAT/>.